

群れのダイナミクスと数理模型

西森拓 *

広島大学大学院理学研究科

1 はじめに

我々を取り巻く自然には数々の群れが存在する。魚の群れ、鳥の群れ、昆虫の群れ... これら生物が群れをなし運動をするのは、何らかの目的を効率よく達成するためであるという解釈がある。例えば渡り鳥であれば、長距離的移動をエネルギーの浪費を避けながら行えるように、流体力学的に有利な群れ形状をつくるという議論である。また、蟻はフェロモンを介して集団採餌行動によって栄養分を効果的に得る。小さな魚は群れて泳ぐことで大きな単体に見せかけると解釈される。ただし、これらの解釈の真偽を確かめるのは次の意味で困難をとまなう。

まず第1に挙げられるのは、生物の行動に合理的な目的というものを付加すること自体に無理があるという問題である。すなわち、生物の行動は個体としても群れとしても最適化されているとは限らないという考えである。これは生物の行動に関する原理的な問題であり、ここではその問題に深く立ち入らない。我々は、少なくともある特定の群れの行動は、生存のためのタスク達成の効率性によって説明される得るという楽観的仮説を立てて、必要に応じて定量的に検証する立場を取っていく。引き続き第2の問題点として、群れに運動に関する制御可能な（あるいは再現可能な）実験／解析が難しく、最適性などをもとに理論的にどのようなストーリーを描いてもその実証が難しいという問題がある。言い換えれば、個体数が有限でかつ互いに相関が強く、さらに種々の量のゆらぎが大きい、いわば「素性のわからない」相手に定量的な議論を押し進めるための方法論が十分に進歩していないという事実がある。しかしながら、第2の問題に関しては、（限られた条件の中ではあるが）いくつかの制御実験や定量的観察が行われつつあり [1]、また、理論的なアプローチについてもすこしづつ試みが始まっている。さらに「生物の群れ」ではないが、「ロボットの群れ」や「砂丘の群れ」について、制御可能な形で群れの性質を考えようという試みも始まっている。

以下、今回のサブゼミで扱う（大きく分けて2つの）対象について、なぜそれぞれの対象を扱うか動機を簡単に述べて、そのあと、蟻の群れ運動に関する筆者

* 広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻

nishimor@hiroshima-u.ac.jp

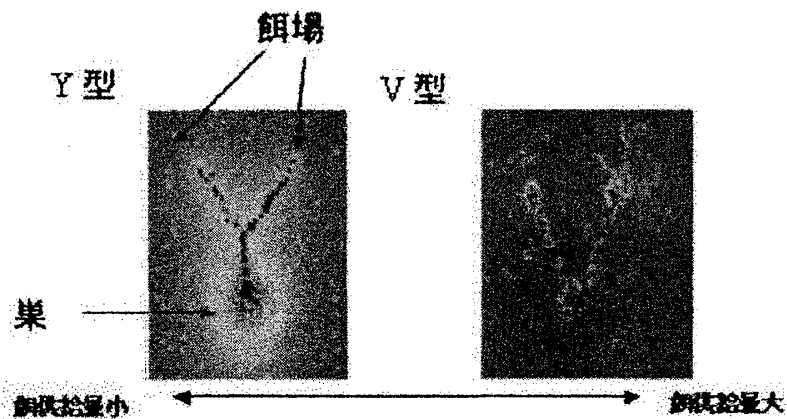


図 1: 餌の供給法と蟻のトレイル (行列) の形状に関する数値計算 [6]。餌の供給のタイミングに応じて、採餌効率のよいトレイルが組織される。グンタイアリの観察においても類似の形状変化がみられる [2]。

の研究の一部を紹介した解説を2節以下に揭示する(田尾知己氏、中川寛之氏との共同研究)。ただし、今回の講義はまだ端緒についたばかりの未完成の研究の紹介がメインであり、講義参加者は、資料の内容を鵜呑みにするのではなく、つっこみどころの発見や議論の材料にという姿勢で活用してほしい。

[扱う対象について]

— 蟻・ロボット —

蟻は(あくまでも他の群れ動物に比較してだが)条件を制御しながら繰り返しデータを取りやすい群れ動物といえる。また、個体の行動様式も比較的単純であり、理論模型を構成し数値的・解析的な手法で得た結果を実験結果と照らし合わせやすいように考えられる。また逆に、模型計算や数理的な解析から得た論理を実験家と共有することで定量的な実験・観察を促すことも可能と考える(図1)。そのような事情から蟻を今回の話題の中心に据える。ただし、理論的な考察で関心事のひとつとなる最適性の概念が実際の蟻にどこまで適用可能かの検証も非常に難しい。そこで、並行して、最初から目的がはっきりしている系を考える。すなわち、ある一定のタスクを課せられた群れを人工的に作成する。これが群れロボットである(図2に例示)。この場合「最適化」という概念が適用可能か否か迷う必要はなくなる。ただし、ロボット達に複数のタスクを課した場合、一つのタスク達成が別のタスクの達成率を阻害することもあり、最適性の定義自体が自明でなくなる。これは生きるために複数のタスクをこなす必要のある多くの生物にも共有される非自明性である。このように、生物の群れの理解とロボットの群れの研究は相補性や共通性をもっている。また、理論模型、とくに多数の動的要素から構成され

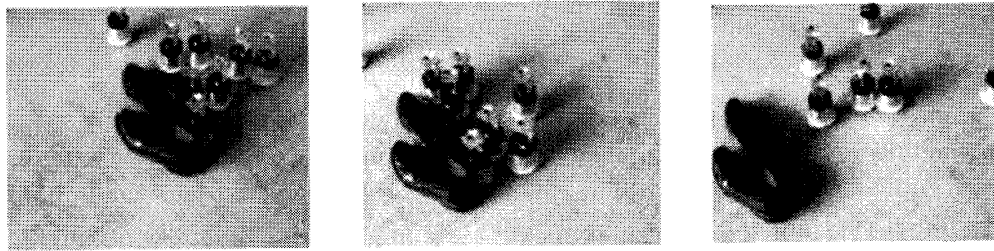


図 2: ロボットの群れによる靴運び。大勢の力で靴を所定の位置（画面左下）に運んだあとロボットたちは解散する。（東北学院大学 菅原研氏による）



図 3: バルハン砂丘の群れ運動。(Photograph courtesy of S.G. Fryberger, Desert Engineering, Golden, CO, early 1980's)

る計算模型は、蟻集団とロボット集団の両者を行き来し、「群れの運動の一般論」を構成する有力な道具となり得る。

—砂丘—

目的やタスクから全くかけはなれた無生物の世界でも「群れ」という見方が系の理解に役立つ場合がある。ここでは、「孤立砂丘」と呼ばれてきたある一定形状の砂丘（バルハン砂丘）の運動の性質が、実は多数の「孤立砂丘」の相互干渉に支配されているとの視点を提示し、個別の砂丘の研究だけでは説明できないいくつかの観測事実を示す（図3）。また、砂丘の制御という社会的要請からみれば、系の運動に対する目的や最適化という概念も（生物の群れにおける概念とちょっと異なるが）適用しうることも紹介する。

2 蟻の群れ

蟻は社会性昆虫と呼ばれる昆虫の一種であり群れをなして生きている。この群れのことをコロニーと呼び、同一コロニー内の蟻は共同作業や分担によって（単一行動の場合に比べて）効率よく種々の作業を行っているように見える。我々は、フェロモンを介して情報をやりとりする（すなわち化学走性に基づいて行動をする）蟻のコロニーの集団採餌行動に関して格子模型を用いてシミュレーションを行い、現在までに、i) トレイル（蟻の行列）の形状と採餌効率の関係 ii) コロニーの構成蟻の非一様性と採餌効率の関係興味深い結果を得た。i) については [6] に記されており、ここでは ii) についての解説を行う。

2.1 蟻の群れの採餌模型

—概要—

図4のように6角形のセルからなる格子上において蟻のコロニーの採餌行動を数値計算によって調べる。具体的には、巣から出発した蟻がフェロモンを放出・追従しながら餌場にたどり着き、その後巣に餌を持ち帰るという単純なタスクを繰り返す。各蟻は一歩進む毎に、現在の状態に応じて2種類のフェロモン（足跡フェロモン/道標フェロモン）のいずれかを放出し、同時に、状態（ランダム歩き/餌探索/帰巣）に応じて2種類のフェロモンのいずれかを確率的に感知、もしくはランダム歩きをしながら進んで行く（図5）。

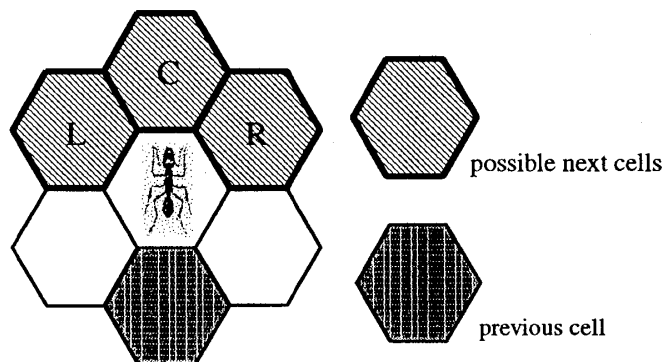


図4: 6角セル上に蟻が配置され、フェロモン濃度差に応じて前3方向から確率的に進行方向を選ぶ。

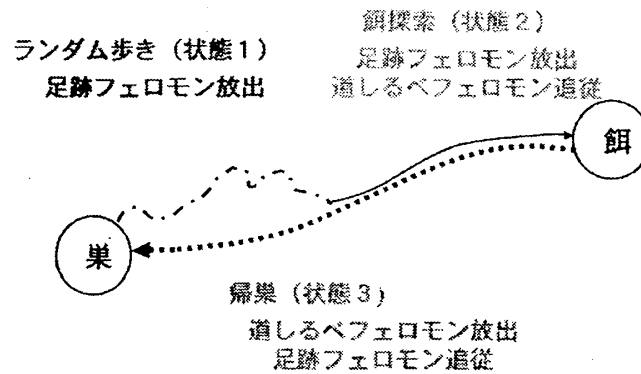


図 5: 状態に応じて 2 種類のフェロモン (足跡フェロモン/道標フェロモン) のいずれかを放出・感知しながら移動する。

— 蟻の動き —

蟻が各時間ステップにおいて (図 4 の中の) 前 3 方向のいずれかを選んで進む確率については、

$$P_{\alpha} = \exp(c\Delta\rho^{\alpha})/Z \quad (1)$$

となるように設定しておく。ここで、 α は進み得る方向 (前方、右前方、左前方) の指標、 $\Delta\rho^{\alpha}$ は進み得る方向のセルと現在のセルにおけるフェロモン濃度の差、 Z は規格化定数である。また、 c は正の定数であり、 c の値が大きい程より濃度の高いフェロモン濃度に向かってより確実に進むことになる。すなわち、 c は個々の蟻のフェロモン感知度の強さのパラメータとなる。

— フェロモン場の時間変化 —

また、一旦放出されたフェロモンは時間とともに蒸発・拡散をする。すなわち、フェロモン濃度 ($\rho(r, t)$) の時間発展を連続場的に表記すると、

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} = D\nabla^2 \rho_j - \kappa_j \rho_j + \eta_j \quad (j = 1, 2) \quad (2)$$

のようになる。ここで j はフェロモンの種類 (足跡/道標) を表す指標であり、 η_j は着目するセルを蟻が通過する際のフェロモンの放出量を表す。

— 餌の供給 —

図 6(b) のように餌は巣から等距離の 2 力所の給餌場所からばらばらに供給される。各々の給餌場所での餌の時間変化は図 6(a) の写像に従って飽和値 (図では 100) まで漸近的に増加していく。もし、蟻が給餌場所で採餌を行った場合、餌は図 6(a) 中の点線矢印で示されたように減少する。その後、再び写像に従って増加する。ここで、写像のグラフにおける切片 M を餌の供給量の指標とし、複数の異なった M の値を用いて数値計算を行う。

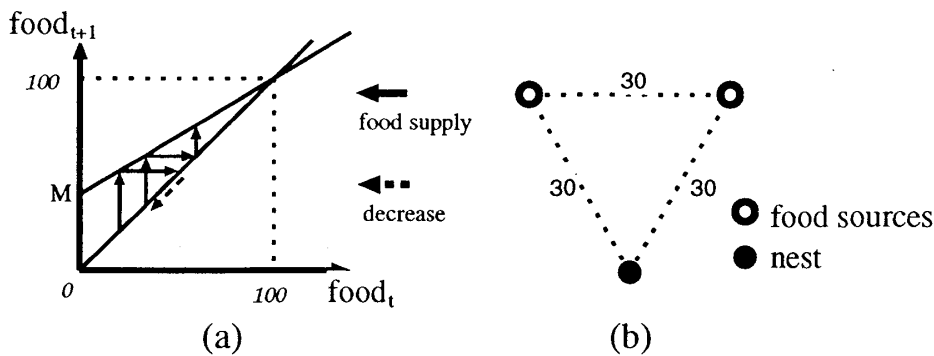


図 6: (a) 各給餌場所の餌量は一定の写像に従って飽和量に漸近的に近づく。図の横軸は時刻 t での餌の量、縦軸は時刻 $t+1$ での餌の量。(b) 巣と2つの給餌場所は、互いに30セル離れた正3角形の頂点をなす。

2.2 フェロモン場とトレイルの形成

仮に一方所の餌場から餌が継続的に供給されている場合、一旦餌場が発見された後は、蟻は餌を持って巣に帰る過程でフェロモンを放出し、そのフェロモンを他の蟻が追従し再びフェロモンを放出することで、より高濃度のフェロモン場が形成される。これが蟻の通り道（トレイル）となり、トレイルに沿って採餌がなされる。このように、フェロモン場の自己増強過程が効率のよい採餌行動の実現と直接に連動している。一方で、餌の供給量が不十分で、どちらか一方所の餌場に蟻が集中した場合、すぐに食い尽くしが起こるような状況では、もう一方の餌場へのトレイルの切り替えが随時必要となる。しかし、すでに食い尽くされた餌場に向かうトレイル上に高濃度のフェロモン場が残存している場合、蟻は既存のトレイルに拘泥し、新たな餌場へのルートの構築／再構築の開始が遅れてしまう。また、餌が継続的に一方所の餌場から供給され続けている場合でも、すでにできあがったトレイルの形状をより最適なものに発展させる必要があるとき（例えば、曲がりくねったトレイルを直線的なものに変化させる過程で）上と同様に、既存のトレイルのフェロモン場の強さがトレイルの道筋の改良をさまたげる場合があり得る。このように、フェロモン場の自己増強は状況に応じて採餌行動に正の影響も負の影響も及ぼし得る。

2.3 数値計算の主な結果—弱追従性蟻の混入と採餌効率の関係

今回の研究では、1つの蟻コロニー全体としての採餌効率を数値的に計算する。先に述べたように「採餌効率」とは一定時間内に餌場の餌を巣まで運び込む蟻の延べ個体数である。ここでは特に、自己増強されたフェロモン場による採餌効率への正と負の影響を同時に考慮する目的で、コロニーを構成する蟻のフェロモン感知度を非一様にした数値実験を行う。すなわち、式(2)における c の値が1とな

る蟻を「(フェロモン場に対する) 基準追従性蟻」と定義し、フェロモン感知度の弱い蟻 ($c < 1$: 「強迫従性蟻」) をコロニーの中に組み込む。すなわち、「混合コロニー」を構成する。

我々はまず、混合コロニーの数値実験を行う前に、「弱迫従性蟻」のみからなるコロニーや、逆に「強迫従性蟻 ($c > 1$)」のみからなるコロニーにおいて、「基準追従性蟻」のみのコロニーに比べて採餌効率が低くなることを確認した。その後、「基準追従性蟻」の集団の中に「弱迫従性蟻」を一部混入したコロニーの採餌効率を数値的に計算した。

具体的には、「基準追従性蟻」と「弱迫従性蟻」合計500匹からなるコロニーを構成し、初期に全個体を巣に配置し、その後一定時間蟻を「働かせて」、コロニー全体としての採餌効率を計算した。ただし、コロニーの特徴として、

1). 「基準追従性蟻」の割合と「弱迫従性蟻」の個体数比 $n : 1 - n$ ($0 \leq n \leq 1$) の調整を行い、かつ、2). 弱迫従性蟻のフェロモン追従度 $0 < c < 1$ を色々と変えて計算を行った。さらに、3). 餌の給餌量の指標 M についても色々と値を変えた。すなわち (n, c, M) の3次元パラメータ空間中の各点で採餌行動の計算を実行し、採餌効率を調べた。その結果、いくつかの興味深い結果を得た。特に顕著なものは次の2点である。

1. いずれの採餌量 M においても、「基準追従性蟻」と「弱迫従性蟻」を適当に混合させることで最大の採餌効率を得る。すなわち、適当な (c, n) をもった混合コロニーは、いかなる一様コロニーに比べても(採餌の意味)で有能であることがわかった(図7)。

2. 混入した弱迫従性蟻の c の値が1に近い場合、最大の採餌効率が達成されないばかりか、基準追従性蟻のみの集団に比べても採餌効率が落ちる場合がある(図8)。すなわち、中途半端にフェロモン感知度が弱い「弱迫従性蟻」を混合させても混合コロニーの良さは出てこない。

2.4 考察・課題

現状では、上で得た結果について、その計算過程で何が起きているのか、全く不十分な理解しかなされていない。以下の記述は、簡単な予備計算などからの推察や素朴な洞察に基づくものであり、確定した分析結果ではないことをことわっておく。

まず、最大採餌効率を達成するために必要とされた、 c の値の非常に低い弱迫従性蟻が自分自身で餌を巣に持ち帰ることはほとんどないことを数値的に確認した。弱迫従性蟻は、基準追従性蟻が餌を得て巣に持ち帰る過程のいずれかにおいて、それらを、何らかの形で補助する役割を担っている。

ここで、具体的に思いつく補助的な役割とは、

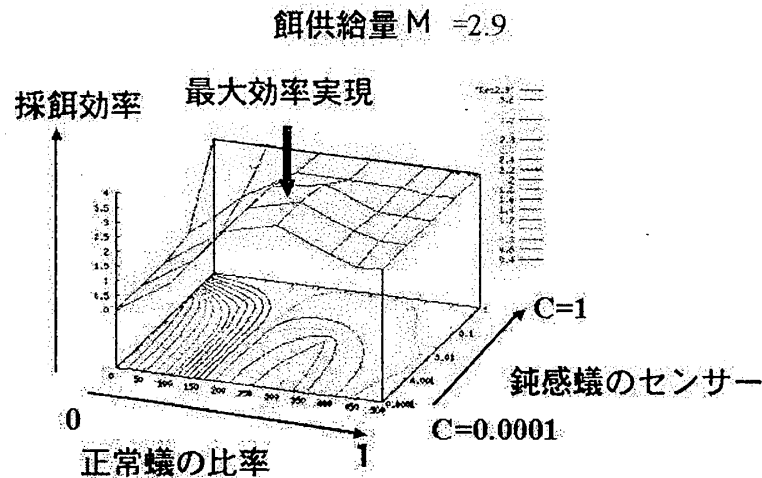


図 7: (n, c) のパラメータ空間の各点での採餌効率。採餌効率が最大になるのは矢印で示されたように基準追従性蟻 (図中では正常蟻) と弱追従性蟻が適当な割合で混ざった場合である

a). 新たな餌場の探索・発見+他の蟻の誘因

b). トレイルの形状をより状況に適したものに改変する役割 (最適化/安定化/修復など)

などであるが、これらがすべての可能な役割を尽くしているかは保証の限りでない。現在まで、a) の役割については否定的な計算結果がでている。これは、上に挙げた、弱追従性蟻を一定数混入したコロニー (混合コロニー) の中の弱追従性蟻を: 「弱追従性+道標フェロモンを出さない」という蟻に置き換えたコロニー (変形混合コロニー) での計算結果から示唆される。上の両コロニー (混合コロニー/変形混合コロニー) での採餌効率を比較した場合、仮に、弱追従性蟻が「新しい餌場を発見して仲間を誘引する」という役割を担っていれば、仲間の誘因物質 (道標フェロモン) を出さない弱追従性蟻は無駄になり、よって上の変形混合コロニーの採餌効率は混合コロニーで得られる最大採餌効率を達成できないはずである。しかしながら、数値計算ではそのような兆候は全く見られず、変形混合コロニーでも混合コロニーとほとんど変わらない最大採餌効率が達成された。さらに、b) の役割に関しては、現在、色々な角度から検証中である。現在までに数値的に検証されたことは、追従性の非常に弱い蟻は巣を出発した後、巣の周りをランダムウォークに近い状態で「ほっつき歩く」ことで、巣の周りに足跡フェロモン濃度の丘を構成するということである。この丘は、餌をもった基準追従性蟻たちが巣に帰ってくる際のランドマークとなる。一方で、足跡フェロモン場によるランドマーク作成「のみ」が弱追従性蟻の存在意義であるとすれば、弱追従性蟻をコロニーから排除し、代わりに固定した足跡フェロモン場を巣の周りに「固着」させ、そ

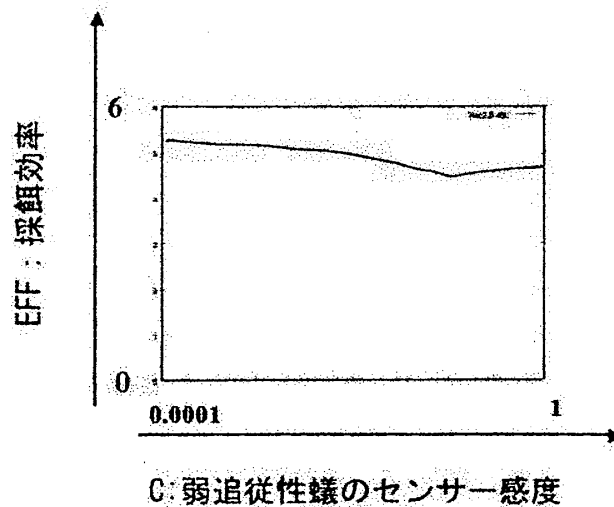


図 8: 図 4 と同様のグラフ (ただし M の値は異なる) において最大採餌効率が達成された位置での n (基準追従性蟻-図では「正常蟻」と記述-の割合) の値に固定して c 方向に変化させたときの採餌効率。弱追従性蟻に関して、 $c=1$ の状態から c を減らしていくと、一度採餌効率が落ちて、その後最大採餌効率の c の値にたどりつく。

ここに基準追従性蟻のみのコロニーを放てば混合コロニーと同じ採餌効率がえられるはずである。しかしながら、現時点の計算結果では、弱追従性蟻の混入したコロニーと固定足跡フェロモン場で代用したコロニーとでは、後者の採餌効率は前者のそれを上回ることができないことが判明している。

繰り返すが、弱追従性蟻の効用は十分には解っていないのが現状である。もちろん、巣の周りの足跡フェロモンによるランドマークの作成など、推察可能な比較的単純な役割を負っていることは間違いない。しかしながら、それだけでは数値計算で得られた混合コロニーの最大採餌効率を達成できない。また、計算結果 2 も考慮すると、今回の問題は「系の構成要素における強い非一様性がいかに系全体に影響を与えるか」という広い問題にも絡むことが解る。風呂敷をひろげた言い方をするならば、今回の問題を色々な方向から検討することで、蟻集団に限らず、交通流や群れロボットを含む様々な集団駆動系のダイナミクスの理解と関連づけられるものと期待できる。

参考文献

- [1] 例えば、H. Weimerskirch et al., "Energy Saving in Flight Formation", Nature 413 (2001): 697-698.

- [2] Holldobler and E.O. Wilson, *The ANTS* (Cambridge University Press, 1990), 蟻の自然史 (朝日新聞社, 1997).
- [3] J.-L. Deneubourg and S. Goss, "Collective Patterns and Decision Making", *Ethol. Ecol. Evol.* 1 (1989): 295-311.
- [4] E. Bonabeau, Marco Drigo and Guy Theraulaz, *SWARM INTELLIGENCE From Natural to Artificial Systems* (Oxford University Press, 1999).
- [5] 中川寛之, 修士論文 (大阪府立大学工学研究科), (2003).
- [6] T. Tao, H. Nakagawa, M. Yamasaki and H. Nishimori, "Flexible foraging of ants under unsteadily varying environment", *J. Phys. Soc. Jpn* **73** (2004): 2333-2341.